

نشربه روش می تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: //anm.yazd.ac.ir

بن کارزر بن کارزر

مقاله پژوهشی

ارائه رابطه تحلیلی بین رنگ کف سلول و عیار ماده معدنی مس در عملیات فلوتاسیون

رضا علی پور قاسمی نژاد^۱، محمدحسین قلی زاده ^{*۱}، حسین قیومی زاده^۱ ۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

(دریافت: مرداد ۱۴۰۲، پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۳)

چکیدہ

کنترل فلوتاسیون عموماً با مشاهده سطح سلولها توسط انسان انجام میشود. سطح سلول عمدتاً توسط رنگ حباب و ویژگی بافت مشاهده شده توسط اپراتورها تنظیم میشود. رنگ کف موجود بر روی سطح سلول شامل اطلاعات ضروری از محتوای مواد معدنی است که با مشاهده طولانی مدت در طول روند فلوتاسیون در مقیاس صنعتی آشکار می شود. ازاین رو، رنگ سطح کف یک عنصر اساسی برای ارزیابی عملکرد فلوتاسیون است. در این مقاله، ارتباط بین رنگ کف موجود در سطح سلول فلوتاسیون و عیار ماده معدنی با تکیه بر روش های پردازش تصویر مورد بررسی قرار می گیرد. نمونه های مورداستفاده در اینجا از معدن مس میدوک در استان کرمان به صورت واقعی تهیه گردیده است. در این براسی، با تهیه فیلم از سطح سلول فلوتاسیون با دور بین عکاسی دیجیتال، ارتباط بین میانگین اجزای رنگی فریم های فیلم های موجود، ویژگی های بافتی هارالیک شامل آنترو پی، یکنواختی تصویر و انرژی و ویژگی پیچیدگی بافت در سه فضای رنگی با عیار ماده معدنی مورد تجزیهوتحلیل قرار می گیرد. سه فضای رنگی مورد بررسی عبارتاند از *RGB پا Stac* با تعاد ماده معدنی مورد تجزیهوتحلیل قرار می گیرد. سه فضای رنگی مورد بررسی عبارتاند از *RGB پا Stac* با عیار ماده معدنی مورد تجزیهوتحلیل قرار می گیرد. سه مین کارماتر های شدت در سه فضای رنگی دارای ضریب همبستگی بین ۱۹۴۹، تا ۳۸۴۸ با عیار هستند. انجام رگر سیون بهت تخمین ریاضی این ارتباط و همچنین مقایسه رگر سیون انجام شده بر اساس معیارهای تئوری نیز مؤید ارتباط نزدیک تر این پارامترها با عیار است، چراکه برای ضریب تعیین مقداری بین ۱۹۶۹، تا ۲۰/۷۰ و برای ضریب تعیین تعدیل شده مقداری بین ۲۶۲۰ /۱۳۷۶ تا ۲۷۲۷/ حاصل شد. قدرت تخمین عیار نیز توسط پارامترهای شدت با معیار خطای ریشه میانگین مربعات (*RMSE)* بین ۲۶۲۰ /۱۳۷۶ /۱ روفت که مقداری بین ۲٫۳۲ تا ۲٫۷۰ توس ۲٫۵۶۹ تا ۲۰۳۷ /۱ و قدرت روش می می زمین می می از مرای زمین می می می زمی روش و می از قدرت روش بر می می زمین می موداری است. بین ۲٫۶۲۰ تا ۲۷۷۷ /۱ سان شد. قدرت تخمین عیار نیز توسط پارامترهای شدت با معیار خطای ریشه میانگین مربعات (*RMSE)*

كلمات كليدى

فضاهای رنگی، سلولهای فلوتاسیون، تعیین عیار، پردازش تصویر

^{*}عهدهدار مكاتبات: gholizadeh@vru.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.20444.1605

۱– مقدمه

فلوتاسیون یکی از مناسبترین روشهای جداسازی مادهی معدنی باارزش از باطله است که دارای پیشینه تاریخی زیادی است [۱]. کنترل فرایند فلوتاسیون توسط بررسی شرایط عملیاتی و تأثیر پارامترهای کلیدی انجام می گیرد [۲]؛ اما مطالعه تأثیر این عوامل به صورت جداگانه در بهبود فرایند فلوتاسیون چندان مناسب نیست.

امروزه بينايي ماشين بهعنوان يك فناوري مناسب براي نظارت و کنترل فرآیند فلوتاسیون شناخته شده است. پردازش تصویر قادر به استخراج پارامترهای تصویر کف موجود بر روی سلول فلوتاسیون و تحلیل رابطهی بین پارامترها با ظاهر سطح کف است. نتایج حاصل از این پردازش می تواند دستورالعمل عملیاتی مناسب را به اپراتورهای کارخانه ارائه و عملکرد تولید را بهطور مؤثر بهبود دهد. در ابتدا روشهایی مقدماتی و نهچندان مؤثر در این زمینه ارائه گردید [۳]. در ادامه، با مدلسازیهای تحلیلی نوین برای ویژگیهای موجود و دخیل کردن ویژگیهای جدید، روشهای بر پایه پردازش تصویر ارتقای چشمگیری داشتند. ویژگیهای بافت خاص ظاهر سطح کف با تغییر در حالتهای توليد فلوتاسيون بهخوبي تغيير شرايط عمليات فلوتاسيون را منعکس میکند. این ویژگیهای بافت تصویر کف ارتباط معناداری با ماده معدنی موجود در لایه کف دارد و درنتیجه نشاندهنده عیار ماده معدنی است.

تجزیهوتحلیل برخط تصاویر کف توسط یک سیستم بینایی ماشین در یک کارخانه فلوتاسیون صنعتی پلاتین برای ارتباط ویژگیهای کف و عملکرد شناور با استفاده از شبکههای عصبی استخراجشده میتواند به بهبود عملکرد فلوتاسیون کمک شایانی نماید [۴]. ویژگیهایی مانند اطلاعات کروماتیک، اندازه متوسط حباب، بافت کف، پایداری کف و تحرک کفهای سطحی در طبقهبندی سلولهای فلوتاسیون استفاده میشود. پردازش تصویر برای تفسیر مناسب اثر ساختار کف در عملکرد فلوتاسیون نیز تنظیم عملکرد یک سلول فلوتاسیون را فراهم میآورد و از تنظیم عملکرد یک سلول فلوتاسیون را فراهم میآورد و از کنترل انعطاف پذیری حباب با اضافه کردن جبران کننده ضریب اطمینان استفاده میشود.

تشخیص تصویر کف سلول فلوتاسیون مس با شبکههای عصبی مختلف نیز قابل|رائه است [۶–۸]. استفاده از متغیرهای تصویر بهعنوان ورودی و عوامل متالورژی بهعنوان خروجی در شبکههای عصبی میتواند منجر به ارائه رابطهای مناسب گردد. در بحث شبکههای عصبی، دو عامل اندازه ابعاد تصویر و سرعت ریزش کف نقش تعیین کننده در مدلسازی این ارتباط دارند [۶]. به کارگیری بینایی ماشین در ایجاد ارتباط بین تصاویر سطح کف و عوامل متالورژی گاهی با استفاده از پارامترهای بافت تصویر در کنار متغیرهای اندازه ابعاد حباب و سرعت ریزش نتایج مطلوبتری را حاصل میکند [۷]. گاهی نیز استفاده از شبکههای عصبی برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای فرایند فرآوری همچون pH، نرخ هوادگی و میزان کلکتور با عیار نهایی ماده معدنی مورداستفاده قرار می گیرد [۸]، اما در اکثر موارد، شبکههای عصبی جهت تجزیهوتحلیل تصویر کف و تخمین غلظت مواد معدنی در مرحلهی کف خالص انجام می گیرد. به هرحال، استفاده از وزنهای اولیه تصادفی برای آموزش شبکه عصبی ممكن است منجر به توقف در مقدار مينيمم محلى و درنتیجه سرعت پایین همگرایی گردد [۹]؛ بنابراین، شبکه عصبی گاهی منتج به جواب مطلوب نمی گردد. شبکه عصبی کانولوشن و الگوریتم ژنتیک بهعنوان روشهای محبوب جهت بهبود عملکرد شبکه عصبی در پیشبینی پارامترهای تصوير كف به كار گرفته مي شود [١١-١١]. قابليت اطمينان کلیه الگوریتمهای ذکرشده بستگی به کیفیت ویژگیهایی دارد که می توانند از تصاویر کف استخراج شوند. به هر حال، این روشها نیز نیاز به محاسبات ریاضی زیاد دارد که خود منجر به مصرف توان و زمان بالایی می گردد. محیطهای صنعتی دارای محدودیت شدید در سختافزارهای محاسباتی هستند و روشهای با بار محاسباتی کم، بهشدت مورد استقبال قرار می گیرد.

یکی از این دسته روش ها که در این مقاله به آن پرداخته می شود، استفاده از رنگ سطح کف به عنوان یکی از مهم ترین ویژگی های قابل استخراج از سطح کف است که شامل اطلاعات ضروری از محتوای مواد معدنی است. این اطلاعات با مشاهده طولانی مدت روند فلوتاسیون در مقیاس صنعتی آشکار می شود. از این رو، رنگ سطح کف یک امر ضروری برای ارزیابی عملکرد فلوتاسیون است. از رنگ سطح کف چندین ویژگی آماری درجه دوم قابل استخراج است که به آن ها ویژگی های هار الیک گویند [11]. یکی از مناسب ترین

روشهای استخراج ویژگیهای هارالیک، استفاده از ماتریس همرخدادی رنگی^۱ (CCM) است که میتواند جایگزین مناسبی برای روش قدیمی ماتریس همرخدادی سطح خاکستری^۲ (GLCM) در تجزیهوتحلیل بافت تصویر کف باشد. پارامتر دیگری به نام پیچیدگی بافت نیز بر اساس این ماتریس همرخدادی قابل به دست آمدن است که در اندازهگیری بافت کف بسیار مؤثر است [۱۳].

رنگ یک تصویر در یک سری فضاهای رنگی سهبعدی با خصوصیات مختلف قابل تعریف است. در فضای رنگی RGB، هر رنگ با ترکیب مقادیری از هرکدام از سه رنگ پایهی قرمز، سبز و آبی ایجاد می شود [۱۴]. فضای رنگی دیگر مدل YCbCr است که طبق استانداردهای اتحادیه بینالمللی ارتباطات^۳ (ITO) بهطور گسترده در تصاویر ویدیویی دیجیتال به کار میرود. در این فضا مؤلفه Y نشاندهنده میزان درخشندگی و مؤلفههای Cb و Cr به ترتیب اختلاف رنگ آبی و رنگ قرمز با اجزای رنگی تصویر را نشان می دهند. در این فضا اجزای رنگی تقریباً از مؤلفهی روشنایی مستقل است. جداسازی صریح و ساده مؤلفههای روشنایی از مؤلفههای رنگ سبب مطلوب بودن این فضای رنگی گردیده است [۱۵]. دیگر فضای رنگی مدل HSI است که در آن مؤلفه H اصل رنگ، مؤلفه S میزان اشباع و مؤلفه I نشاندهنده روشنایی است. فضای رنگی HSI ارتباطی نزدیک به تفسیر و توصیف انسان از رنگ دارد و اطلاعات رنگ و سطح خاکستری را در یک تصویر جداسازی مینماید. این فضا تلاش میکند که رنگها را بهصورت حسیتری نشان دهد [۱۶].

کلیه تصاویر موردبررسی در این مقاله مربوط به یک سلول فلوتاسیون در بخش تغلیظ مجتمع مس میدوک است. از آنجاکه مواد معدنی بر روی سطح سلول فلوتاسیون دارای رنگی یکنواخت هستند، جداسازی مؤلفههای روشنایی از مؤلفههای رنگ سبب مطلوب شدن تجزیهوتحلیل می گردد. لذا در کنار فضای رنگی مشهور RGB، دو فضای رنگی دیگر YCbCr و ISI نیز بهدقت موردبررسی قرار می گیرند. جداسازی مؤلفه روشنایی از مؤلفههای رنگ در این دو فضای رنگی سبب جذابیت تجزیهوتحلیل در این دو فضا می گردد.

در این مقاله با استفاده از ماتریس همرخدادی رنگی، ویژگیهای هارالیک و همچنین ویژگی پیچیدگی بافت تصاویر در هر سه فضای رنگی ذکرشده بررسی می گردد. در کنار این ویژگیها، مؤلفههای سه گانه در هر سه فضا نیز

اندازه گیری شده و مورد تجزیهوتحلیل قرار می گیرد. درنهایت خواهیم دید که مؤلفههای شدت در هر سه فضای رنگی ما را به تعیین دقیق تر عیار ماده معدنی میرساند.

در ادامه و در بخش دوم روش تحقیق و جزئیات آن ارائه می گردد. در بخش سوم با ارائه نتایج کار و ارزیابی آن به بحث در مورد نقش رنگ در تحلیل فرایند فلوتاسیون می پردازیم. در پایان نیز نتیجه گیری این پژوهش بیان می شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- نمونه گیری و فیلمبرداری

فیلمبرداری از سطح کف سلول فلوتاسیون با دوربین گوپرو ۶ با قابلیت فیلمبرداری ۶۰ فریم بر ثانیه انجام گرفت که در ارتفاع ۵۰ سانتیمتری سطح کف نصب شد. انتخاب این ارتفاع به این دلیل بود که دوربین باید در فاصله مناسبی از سطح کف قرار گیرد، چراکه در بالای سلول فلوتاسیون، مخصوصاً در هوای سرد، بخار تولید میشود و با نشستن بخار بر روی صفحه شیشه دوربین، کیفیت تصویر پایین آمده و تصویر دچار مات شدگی میشود؛ بنابراین، باید یک فاصله قابلقبول از سطح کف برای نصب دوربین در نظر گرفته شود که ما فاصله ۵۰ سانتیمتر را انتخاب نمودیم.

ثابت بودن میزان نور و مکان دوربین برای تمامی نمونهها از اهمیت زیادی برخوردار است. همان گونه که در شکل ۱ قابل مشاهده است، برای تأمین روشنایی تصویر از لامپ هالوژن استفاده شد. همزمان با فیلم برداری، از ماده کنسانتره نیز نمونه برداری انجام می گیرد و برای عیار سنجی مس به آزمایشگاه ارسال می شود.



شکل ۱: نمایی از سلول فلوتاسیون و سیستم بینایی ماشین

فیلمبرداری در طول ۳ ماه از یک سلول فلوتاسیون فعال در بخش تغلیظ مجتمع مس میدوک انجام گرفته است. این سلول اولین سلول رافر از ۱۴ سلول رافر^۴ بخش تغلیظ است که تحلیل سطح کف در این سلول نقش حائز اهمیتی در تصمیم گیریهای اپراتورهای خط دارد. سعی بر این بود که فیلمها در طول هفتههای مختلف و در اوقات مختلف روز، همچون صبح، ظهر و عصر گرفته شود. حاصل کار ۱۰۹ عدد فیلم ۱۲۰ ثانیهای بود که از هر فیلم، ۱۰ فریم بافاصله زمانی فیلم ۱۲۰ ثانیهای بهعنوان فریمهای تصویر موردنظر استخراج گردید. یک نمونه از این فریمها در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲: نمونه فریم استخراج شده از سلول فلوتاسیون

۲-۲- تحلیل تصاویر

بر اساس بخش ۲-۱، برای هر یک از ۱۰۹ فیلم موجود، با ۱۰ فریم روبرو هستیم. برای هر یک از این ۱۰ فریم بهطور جداگانه، ویژگیهای مختلف رنگ موردبررسی قرار میگیرد. ویژگیهای موردبررسی در این مقاله برای هر فریم جمعاً ۷ مورد هستند که عبارتاند از میانگین سه مؤلفه رنگی، سه ویژگی از ویژگیهای چهاردهگانه بافت تصویر و ویژگی پیچیدگی بافت تصویر. ازآنجاکه بررسی ویژگیها در هر سه فضای رنگی TGBR، YCbCr و HSI مورد تحلیل قرار میگیرد، جمعاً ۲۱ ویژگی موردمحاسبه قرار میگیرند.

سپس میانگین ۱۰ عدد بهدستآمده از ۱۰ فریم برای هرکدام از ویژگیها، بهعنوان عدد مربوط به آن ویژگی برای هر فیلم مربوطه ثبت میگردد؛ بنابراین، داده نهایی ما ۲۱ ویژگی محاسبهشده برای ۱۰۹ فیلم موجود است. از طرف دیگر، همانگونه که قبلاً ذکر شد، برای کلیه این ۱۰۹ فیلم، همزمان با فیلمبرداری، از ماده کنسانتره نیز نمونهبرداری

انجام گرفت و برای عیارسنجی مس به آزمایشگاه ارسال شد و نتیجه به دست آمد. نمونهای از تحلیل کانیشناسی مربوط به کنسانتره که توسط آزمایشگاه تهیه شده است، در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است. در این جدول کانیهای موجود در کنسانتره بهصورت درصدی بیان شده است و درجه آزادی آنها نیز به نمایش گذاشته شده است.

۵۱,۶	درصد كالكوپيريت	٧٠	درجه آزادی کالکوسیت
۲۷٫۵	درصد پيريت	1	درجه آزادی کوولیت
٨۴٫٣	مینرالهای فلزی	۹۱٫۳	درجه آزادی کالکوپیریت
14,8	مینرالهای غیرفلزی	٩٧,٩٩	درجه آزادی پیریت
١,١	مینرالهای اکسیدی	۲,۴۹	درصد كالكوسيت
۲۲,۲	عيار كنسانتره	٣	درصد كووليت

جدول ۱: نمونهای از تحلیل کانی شناسی کنسانتره

کانیهای ارزشمند در تولید مس کالکوسیت، کوولیت و کالکوپیریت هستند و کانی مزاحم، کانی پیریت است. هرکدام از کانیهای ارزشمند دارای درصد خاصی از مس هستند که مجموع آنها عیار نهایی مس را برای ما به ارمغان میآورد. لذا، با برقرار کردن ارتباط بین رنگ و عیار میتوان به برآیند میزان نقش کانیهای مفید در کنسانتره دستیافت. سه ویژگی میانگین مؤلفه رنگی در هر سه فضای رنگی به سهولت قابل محاسبه است؛ اما قبل از بیان ادامه کار، ضروری است که با سه ویژگی از ویژگیهای چهارده گانه بافت تصویر و ویژگی پیچیدگی بافت تصویر بیشتر آشنا شویم که در ادامه تشریح می گردد.

۲-۲-۱ استخراج ویژگیهای بافت تصاویر کف

ماتریس همرخدادی رنگی درواقع ویژگیهای توزیع رنگ مکانی را در یک تصویر اندازه می گیرد که معمولاً برای استخراج ویژگیهای بافت تصاویر رنگی استفاده می شود [۱۳]. این ماتریس احتمال همزمانی وقوع دو پیکسل در تصویر در مکان(*i*,*j*) را اندازه گیری می کند. بااین حال، از آنجاکه اطلاعات رنگ پیکسل از تصویر کف برای توصیف عملکرد فلوتاسیون مهم است، ما به طور عمده شباهتهای مؤلفههای فضای رنگی را در همان موقعیت تصویر بین مؤلفههای مختلف فضای رنگی بررسی می کنیم [۱۳]:

$$\mathcal{CCM}_{m,n}(i,j) = \sum_{x} \sum_{y} \{ \substack{1m(x,y)=i\&n(x,y)=j\\0 otherwise}, \qquad (1)$$

n که در این رابطه، *i* و *j* مقدار مؤلفه فضای رنگی *m* و مؤلفههای فضای رنگی و *x* و *y* موقعیت روی تصویر است.

۲-۲-۲ استخراج ویژگیهای هارالیک از تصویر بافت کف

مجموعهای از آمارهایی که نمایانگر ویژگیهای بافت تصویر هستند میتوانند بر اساس ماتریس همرخدادی رنگی محاسبه شوند. ویژگیهای بافت کف فلوتاسیون را یکی از اصلیترین پارامترها در نظر میگیرند که عیار ماده معدنی موجود در لایه کف را نشان میدهد که ازاینرو شاخص مهمی برای عملکرد فلوتاسیون است.

ویژگیهای هارالیک از تصاویر کف بر اساس ماتریس همرخدادی رنگی استخراج میشود. هارالیک ۱۴ ویژگی آماری را برای نشان دادن ویژگیهای بافت معرفی میکند. از میان ۱۴ ویژگی پیشنهادی هارالیک، سه مورد بهطورکلی توسط محققان استفاده میشود که عبارتاند از [۱۳]:

- آنتروپی^۵

$$ENT = -\sum_{i=1}^{L1} \sum_{j=1}^{L2} p(i,j) \log\{p(i,j)\}, \qquad (\Upsilon)$$

$$ASM = \sum_{i=1}^{L1} \sum_{j=1}^{L2} (p(i,j))^2, \qquad (\degree)$$

$$IDM = \sum_{i=1}^{L1} \sum_{j=1}^{L2} \frac{p(i,j)}{1+|i-j|^2},$$
(f)

که در روابط با لا(p(i,j) ماتریس همرخدادی رنگی بهدستآمده در رابطه (۱) بوده، *i* و *j* سطر و ستون، و L1 و L2 تعداد کل سطرها و ستونهای ماتریس مذکور است. برای محاسبه این مجموعه از ویژگیها باید در ابتدا ماتریس همرخدادی رنگی نرمال شده و سپس روابط مربوطه محاسبه شود. برای نرمال سازی ماتریس کافی است که ارزش هر خانه به مجموع کل ارزشهای درون ماتریس تقسیم گردد. از آنجاکه می توان بر اساس هر یک از ماتریسهای همرخدادی رنگی، شش گروه از ویژگیهای مستقل را به دست آورد، میانگین این ویژگیها از شش ماتریس فوق بهعنوان ویژگی تصویر نهایی کف در تجزیهوتحلیل دادهها استفاده می شود.

به منظور کاهش محاسبات و حفظ توصیف پیچیدگی بافت تصویر کف در همان زمان، دو ویژگی مربوط به آنتروپی و یکنواختی تصویر بهطور مستقیم از هر ماتریس همرخدادی رنگی استخراج میشود و با استفاده از آنها پارامتر T استخراج میشود که همان پیچیدگی بافت تصویرکف است [11]:

$$T = \frac{ENT}{IDM} \tag{(a)}$$

۳- نتایج و بحث

همان گونه که در بخش ۲- ۲ بیان گردید، مقادیر ۷ گانه ویژگیهای مربوط به فیلمها در سه فضای YCbCr ،RGB و HSI محاسبه میشود. از طرف دیگر مقدار عیار مربوط به هر فیلم نیز از آزمایشگاه دریافت می گردد. سپس، مقادیر این ویژگیها برحسب عیار رسم میشود. نتایج به تفکیک سه فضای رنگی در ادامه به نمایش گذاشته میشود. لازم به ذکر است که عدد مربوط به عیار نشاندهنده درصد عیار است. بهعنوانمثال عدد ۲۲، یعنی عیار مس در کنسانتره مس در زمان نمونهبرداری ۲۲ درصد است.

RGB نتایج در فضای

RGB میانگین مؤلفههای فضای رنگی

در شکلهای ۳، ۴ و ۵ مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفههای فضای رنگی RGB ارائه گردیده است. شکل ۳ نمایشدهنده ۱۰۹ مقدار عیار برحسب میانگین مؤلفه قرمز ۱۰۹ فیلم موجود است. شکلهای ۴ و ۵ نیز این مقادیر را به ترتیب نسبت به میانگین مؤلفههای سبز و آبی فیلمها به تصویر کشیدهاند.







۲-۳- نتایج در فضای YCbCr

۲-۲-۳ میانگین اجزای فضای رنگی YCbCr

در شکلهای ۱۱،۱۰ و ۱۲ مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفههای فضای رنگی YCbCr ارائه گردیده است. شکل ۱۰ نمایشدهنده مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفه Y مربوط به ۱۰۹ فیلم موجود است. شکلهای ۱۱ و ۱۲ نیز این مقادیر را به ترتیب نسبت به میانگین مؤلفههای Cb و Cr فیلمها به تصویر کشیدهاند.







شکل ۴: مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفه سبز در فضای



60 70 80 90 100 110 120 130 Mean B شکل ۵: مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفه آبی در فضای رنگی RGB

10 – 60

RGB ویژگیهای هارالیک در فضای رنگی

در ادامه، ویژگیهای هارالیک در این فضا نسبت به عیار موردبررسی قرار می گیرد. در شکلهای ۶، ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر عیار برحسب آنتروپی، انرژی و یکنواختی قابلمشاهده است.







شکل ۷: مقادیر عیار برحسب انرژی در فضای رنگی RGB





۳-۲-۳- ویژگی پیچیدگی بافت کف در فضای رنگی YCbCr

درنهایت، ویژگی پیچیدگی بافت کف در این فضا نسبت به عیار موردبررسی قرار میگیرد. در شکل ۱۶ مقادیر عیار برحسب پیچیدگی بافت کف به نمایش گذاشته شده است.

۳-۳- نتایج در فضای HSI

HSI میانگین اجزای فضای رنگی

در شکلهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفههای فضای رنگی HSI ارائه گردیده است. شکل ۱۷ نمایشدهنده مقادیر عیار برحسب میانگین مؤلفه H مربوط به ۱۰۹ فیلم موجود است. شکلهای ۱۸ و ۱۹ نیز این مقادیر را به ترتیب نسبت به میانگین مؤلفههای S و I فیلمها به تصویر کشیدهاند.









۲-۲-۳ ویژگیهای هارالیک در فضای رنگی YCbCr

در ادامه، ویژگیهای هارالیک در این فضا نسبت به عیار موردبررسی قرار میگیرد. در شکلهای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مقادیر عیار برحسب آنتروپی، انرژی و یکنواختی قابلمشاهده است.







شکل ۱۴: مقادیر عیار برحسب انرژی در فضای رنگی YCbCr



شکل ۲۲: مقادیر عیار برحسب یکنواختی در فضای رنگی HSI

HSI ویژگی پیچیدگی بافت کف در فضای رنگی HSI

درنهایت، ویژگی پیچیدگی بافت کف در این فضا نسبت به عیار موردبررسی قرار میگیرد. در شکل ۲۳ مقادیر عیار برحسب پیچیدگی بافت کف به نمایش گذاشته شده است.



تاکنون ارتباط بین عیار و ویژگیهای هفتگانه بهصورت جامع در هر سه فضای رنگی YCbCr ، RGB و HSI و موردبررسی قرار گرفت. در بررسی نتایج بهدستآمده، همانطور که در شکلهای ۳ تا ۲۳ قابلمشاهده است، مشخص گردید که نتایج مربوط به مؤلفههای شدت در هر سه فضای رنگی برتری معناداری، حتی در مقایسه با ویژگی-های هارالیک و پیچیدگی بافت کف در این سه فضا دارند. منظور از مؤلفههای شدت در فضای RGB همان میانگین مؤلفههای قرمز، سبز و آبی هستند که در شکلهای ۳، ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

مؤلفه شدت در دو فضای YCbCr و HSI نیز به ترتیب همان میانگین مؤلفه Y و میانگین مؤلفه I است که در شکلهای ۱۰ و ۱۹ قابلمشاهده است. برای اینکه تنها بر پایه مشاهده شکلها تصمیم گرفته نشود و تحلیل آماری دقیقی نیز انجام شود، ضریب همبستگی بین کلیه ۲۱ ویژگی با درصد عیار محاسبه و در جدول ۲ ارائهشده است. بر پایه این جدول نیز قابل نتیجه گیری است که مؤلفههای شدت در هر سه فضای رنگی ارتباط معناداری با مقدار عیار دارند.



HSI ویژگیهای هارالیک در فضای رنگی

در ادامه، ویژگیهای هارالیک در این فضا نسبت به عیار موردبررسی قرار میگیرد. در شکلهای ۲۰، ۲۱ و ۲۲ به ترتیب مقادیر عیار برحسب آنتروپی، انرژی و یکنواختی قابلمشاهده است.



شکل ۲۰: مقادیر عیار برحسب آنتروپی در فضای رنگی HSI



شکل ۲۱: مقادیر عیار برحسب انرژی در فضای رنگی HSI

 $g = 0.26Y - 4 \tag{9}$

g = 0.22I + 0.45 (1.)

که در روابط بالا g مقدار عیار و پارامترهای G ،R ، G ، R ، و I به ترتیب نشاندهنده میانگین مؤلفههای قرمز، سبز، آبی، مؤلفه Y و مؤلفه I است.

برای درک شهودی بهتر در شکلهای ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۸ نتیجه رگرسیون نمودار پراکندگی عیار برحسب میانگین مؤلفههای شدت بر اساس روابط (۶) تا (۱۰) ارائه گردیده است.



10 10 10 10 110 120 130 60 70 80 90 100 110 120 130 Mean G

شکل ۲۵: نتیجه رگرسیون بین عیار با میانگین مؤلفه سبز در RGB فضای رنگی



شایان ذکر است که مؤلفه Cb نیز در این جدول دارای ضریب همبستگی بالا ولی با علامت منفی است که برای تعیین عیار می تواند مورداستفاده قرار بگیرد، اما به دلیل همخوانی نداشتن با مؤلفههای شدت در اینجا مورداتکا قرار نمی گیرد.

جدول ۲: ضریب همبستگی ۲۱ ویژگی با عیار

ویژگی	ضریب همبستگی	ویژگی	ضریب همبستگی
Mean R	۰ _/ ۸۴۶۱	ASM _{YCbCr}	-•,٣١٧•
Mean G	۰,۸۴۶۵	IDM _{YCbCr}	•/1174
Mean B	۰ _/ ۸۴۸۳	T _{YCbCr}	۰,۳۲۵۸
ENT _{RGB}	• , ~ • 	Mean H	•,74•4
ASM _{RGB}	-•,∆۳۲Υ	Mean S	-•, \Υ Δλ
IDM _{RGB}	·/1847	Mean I	٠٫٨۴٧۶
T _{RGB}	·/2061	ENT _{HSI}	• , ٣ • 1 ٣
Mean Y	۰,۸۴۷۷	ASM _{HSI}	-•,14•4
Mean Cb	<u></u> −∙,⋏۴۶۹	IDM _{HSI}	•,10•٣
Mean Cr	·/1717	T _{HSI}	•,٢٣١٣
ENT _{YCbCr}	٠,٣۶٩٧		

۳–۴– انتخاب مدل رگرسیون

در ادامه، با تکیهبر رگرسیون خطی به دنبال یافتن مدل مناسبی برای ارائه ارتباط بین عیار و مؤلفههای شدت هستیم. ازآنجاکه به ۱۰۹ نمونه دسترسی داریم، ۸۹ نمونه را برای یافتن مدل مورداستفاده قرار میدهیم. ۲۰ نمونه باقیمانده برای مورد آزمایش قرار دادن میزان صحت مدل بهدستآمده به کار گرفته میشوند. این ۲۰ نمونه بهصورت کاملاً تصادفی از بین ۱۰۹ نمونه انتخاب میگردد.

از آنجاکه ۵ مؤلفه شدت را در اختیار داریم، به دو صورت به محاسبه مدل می پردازیم. در روش اول، مدل ریاضی بین عیار و هر یک از ۵ مؤلفه شدت به صورت جداگانه محاسبه می گردد. در ادامه روابط ریاضی مدل رگرسیون خطی برای ۵ مؤلفه شدت ارائه می گردد. این روابط عیار را به ترتیب برحسب میانگین مؤلفه های قرمز، سبز، آبی، مؤلفه Y و مؤلفه I نشان می دهند.

g = 0.22R + 0.86 (?)

$$g = 0.22G + 0.31$$
 (Y)

g = 0.22B + 0.75 (A)



شکل ۲۸: نتیجه رگرسیون بین عیار با میانگین مؤلفه I در فضای رنگی HSI

در روش دوم، برای اینکه هر ۵ مؤلفه شدت در تعیین مدل بهصورت همزمان تأثیرگذار باشند، یک مدل رگرسیون خطی ۵ متغیره ارائه میگردد. در این رابطه عیار بهعنوان تابعی از ۵ متغیر شدت بهصورت زیر بیان میگردد.

g = 878.23R + 206.93G - 183.24B-213.59Y + 10.77RG - 15.42RB -39.92RY + 34.18RI - 28.23GB +1.06GY + 28.46GI + 21.34BY +27.49BI - 15.65YI - 1.83RGB (\\) +.039RGY + 1.39RGI + 1.33RBY +0.70RBI - 1.31RYI + .55GBY +1.55GBI - 0.94GYI - 2.07BYI -2.07RGBY

که پارامترهای ارائهشده در این رابطه دلالت بر همان مؤلفههای ذکرشده در روابط (۶) تا (۱۰) را دارند. اگرچه مدل ارائهشده در رابطه (۱۱) جامعتر است، اما پیچیدگی آن نسبت به روابط (۶) تا (۱۰) بیشتر است.

برای ارزیابی صحت مدلهای رگرسیونهای بهدست آمده از دو معیار تئوری ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده استفاده می کنیم [۱۷]. معیار ضریب تعیین و یا اصطلاحاً R²، به منظور محاسبه آماری میزان نزدیکی داده ها به خط رگرسیون برازش شده است. معیار ضریب تعیین تعدیل شده و یا اصطلاحاً Adjusted-R² نسبت به ضریب تعیین، بهتر می تواند تأثیر واقعی متغیرهای مستقل را بر روی متغیر

وابسته به نمایش بگذارد. مقدار این دو معیار هرچه از صفر به سمت یک حرکت کند و به یک نزدیکتر شود، بیانگر نزدیکی بیشتر نقاط پراکندگی به خط برازش شده است. مقادیر بهدستآمده برای این دو معیار مربوط به رگرسیونهای تک متغیره ارائهشده در روابط (۶) تا (۱۰) و رگرسیون ۵ متغیره ارائهشده در رابطه (۱۱)، به ترتیب در جدول ۳ به نمایش گذاشته است. مقادیر حاصل نشاندهنده قوی بودن مدل رگرسیون برای برازش ۸۹ نمونهی در دسترس است.

	\mathbb{R}^2	Adjusted R ²
Mean R	۰ _/ ۷۲۶۹	۰ ,۷۲۳۸
Mean G	۰,۷۲۹۱	۰,۷۲۶۰
Mean B	٠,٧٢٩٠	۰٫۷۲۵۹
Mean Y	۰ ، ۳۳۰ ۲	• /YTY1
Mean I	•,VY9F	۰,۷۲۶۳

. 8898

. 877.

Multivariate

جدول ۳: مقدار معیارهای ارزیابی برای مدلهای رگرسیون

در ادامه فقط به قوی بودن مدل رگرسیون بسنده نمی کنیم، بلکه با استفاده از ۲۰ نمونه انتخاب شده، مدل های بهدستآمده را مورد آزمایش قرار میدهیم و خطای حاصل را محاسبه می کنیم. در این محاسبات ریشه میانگین مربعات خطا^ (RMSE) بهعنوان خطای هر یک از ۲۰ نمونه آزمون در نظر گرفته می شود. سپس، میانگین این خطا برای هر یک از مدلهای رگرسیون در جدول ۴ ارائه می گردد. نتایج حاصل نشان مىدهد كه كليه مدلهاى مربوطه قدرت مناسبی برای پیشبینی عیار را دارند. بهعنوان مثال اگر از مدل مربوط به میانگین مؤلفه قرمز برای پیشبینی عیار استفاده شود، این مدل قادر به تعیین عیار با خطای ۲٬۳۵ درصدی است که کاملاً قابل قبول و قابل اتکا است. در این جدول پارامتر RMSE برای نمونههای آموزشی نیز محاسبه شده است که در اکثر موارد خطای کمتری را به ارمغان میآورد، چراکه مدل رگرسیون انطباق بیشتری بر روی نمونههای آموزشی نسبت به نمونههای آزمون دارد.

برای اطمینان از روش پیشنهادی، خطای انواع روشهای تشخیص عیار بر پایه شبکههای عصبی ارتقا یافته مختلف در مراجع [۶–۸] نیز در جدول ۴ آورده شد. مقایسه خطای روش پیشنهادی با روشهای دیگر نشاندهنده این است که

روش پیشنهادی در مرز مقبول و قابلاتکا است، با این تفاوت که نیاز به زمان و توان بهمراتب کمتری دارد.

جدول ۴: خطای پیشبینی عیار بر اساس مدل های رگرسیون

	RMSE	RMSE
	نمونههای آموزشی	نمونههای آزمون
Mean R	١,۴٨	۲٫۳۵
Mean G	١,٣٢	۲,۴۴
Mean B	١,- ٩	۲٫۳۵
Mean Y	۲,۰۱	۲٫۳۸
Mean I	۱,۰۱	۲٫۳۲
Multivariate	1,74	۲,۷۰
NN [6]	١,٣٩	۱, • ۷
NN [7]	١,- ١	٠,٩۴
NN [8]	1,77	١,٣۵

در شکل ۲۹ نیز مقدار واقعی و تخمین زده شده عیار مربوط به ۲۰ داده مورد آزمایش نشان داده شده است. نمودار با عنوان "Grade" مقدار واقعی درصد عیار را ارائه میدهد. نمودارهای دیگر این شکل، درصد عیار تخمین زده شده توسط روابط (۶) تا (۱۱) را به نمایش گذاشته است تا قدرت پیشبینی عیار توسط روش ارائهشده نیز برای تکتک نمونههای آزمایش مورد محک قرار گیرد.



با تکیهبر جدول ۳ و ۴ و شکل ۲۹ می توان ادعا کرد که اگرچه مدل چند متغیره در رابطه (۱۱) به صورت جامع کلیه مؤلفه های شدت را در تعیین عیار دخیل می کند و نتایج مناسبی را ارائه می دهد، اما مدل های تک متغیره در روابط (۶) تا (۱۰) دارای معیارهای ارزیابی مناسب تر و خطای

کمتری هستند؛ بنابراین برای سهولت میتوان هر یک از مدلهای تک متغیره را بهطور دلخواه مورداستفاده کرد و عیار را با دقت بالا پیشبینی نمود.

۴- نتیجهگیری

در این مقاله رنگ سطح کف سلول فلوتاسیون با تکیهبر ویژگیهای هارالیک، ویژگی پیچیدگی بافت و میانگین مؤلفههای سهگانه در هر سه فضای رنگی موردبررسی قرار میگیرد. در کنار فضای رنگی مشهور RGB، دو فضای رنگی YCbCr و HSI نیز به دلیل جداسازی مؤلفه روشنایی از مؤلفههای رنگ مورد تجزیهوتحلیل قرار میگیرند.

شکلهای ۳ تا ۲۳ و جدول ۲ نشان میدهد که ۵ پارامتر مربوط به مؤلفههای شدت در سه فضای رنگی در بین ۲۱ پارامتر رنگی، ازنظر شهودی و معیارهای تئوری در سطح خوبی قرار دارند.

پس شایان توجه است که هم ازلحاظ شهودی و هم ازنظر تئوری، میتوان نتیجه گرفت که برای ایجاد ارتباط بین رنگ ظاهری کف و عیار، بهترین مؤلفههای رنگ عبارتاند از مؤلفههای شدت در سه فضای رنگی. قدرت تخمین عیار توسط پارامترهای شدت با معیار عیار برای سه مؤلفه مربوطه گرفت که در فضای RGB این معیار برای سه مؤلفه مربوطه مقداری بین ۲٫۳۵ تا ۲٫۴۴ درصد، در فضای YCbCr برای مؤلفه Y مقدار ۲٫۳۸ درصد و در فضای HSI برای مؤلفه I مقدار ۲٫۳۲ درصد را نتیجه داد که حاکی از قدرت روش پیشنهادی است؛ بنابراین، این ۵ مؤلفه میتوانند معیارهای قابل اعتماد برای انجام اتوماسیونی تعیین عیار در معادن گردند و تا حد بسیار زیادی یاری رسانندهی اپراتورهایی باشند که در سطح معادن به این مهم می پردازند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از شرکت ملی صنایع مس ایران بهویژه مجتمع مس شهربابک که در تهیه این مقاله یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

[9] Chang, Y. T., Lin, J., Shieh, J. S., & Abbod, M. F. (2012). Optimization the initial weights of artificial neural networks via genetic algorithm applied to hip bone fracture prediction. Advances in Fuzzy Systems, 2012(6), 1-9.

[10] Zarie, M., Jahedsaravani, A., & Massinaei, M. (2020). Flotation froth image classification using convolutional neural networks. Minerals Engineering, 155, 106443.

[11] Allahkarami, E., Salmani Nuri, O., Abdollahzadeh, A., Rezai, B., Maghsoudi, B., (2017). "Improving estimation accuracy of metallurgical performance of industrial flotation process by using hybrid genetic algorithm - artificial neural network (GA-ANN)". Physicochemical problems of mineral processing, 53(1), 366–378.

[12] Hung, C. C., Song, E., Lan, Y., Hung, C. C., Song, E., & Lan, Y. (2019). Image texture, texture features, and image texture classification and segmentation. Image Texture Analysis: Foundations, Models and Algorithms, 3-14.

[13] Wen, Z., Zhou, C., Pan, J., Nie, T., Jia, R., & Yang, F. (2021). Froth image feature engineeringbased prediction method for concentrate ash content of coal flotation. Minerals Engineering, 170, 107023.

[14] García-Lamont, F., Cervantes, J., López-Chau, A., & Ruiz-Castilla, S. (2020). Color image segmentation using saturated RGB colors and decoupling the intensity from the hue. Multimedia Tools and Applications, 79, 1555-1584.

[15] Rismayana, A. H., Alfianti, H., & Ramdan, D. S. (2022). Facial Skin Color Segmentation Using Otsu Thresholding Algorithm. Journal of Applied Intelligent System, 7(1), 26-35.

[16] Shiping, M. (2018). A Low-Light Sensor Image Enhancement Algorithm Based on HSI Color Model, 2018. Sensors, 18, 3583.

[17] Mendenhall W., Sincich T., (2019). A second course in statistics: regression analysis. Pearson, 8th edition.

[2] Drzymala, J., Kowalczuk, P. B., Oteng-Peprah, M., Foszcz, D., Muszer, A., Henc, T., & Luszczkiewicz, A. (2013). Application of the grade-recovery curve in the batch flotation of Polish copper ore. Minerals Engineering, 49, 17-23.

[3] Barbian, N., Cilliers, J. J., Morar, S. H., & Bradshaw, D. J. (2007). Froth imaging, air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance. International Journal of Mineral Processing, 84(1-4), 81-88.

[4] Aldrich, C., Marais, C., Shean, B. J., & Cilliers, J. J. (2010). Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review. International Journal of Mineral Processing, 96(1-4), 1-13.

[5] Nakhaei, F., Irannajad, M., & Mohammadnejad, S. (2023). A comprehensive review of froth surface monitoring as an aid for grade and recovery prediction of flotation process. Part A: Structural features. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45(1), 2587-2605.

[6] Jahedsaravani, A., Marhaban, M., & Massinaei, M. (2014). Prediction of the metallurgical performances of a batch flotation system by image analysis and neural networks. Minerals Engineering, 69, 137-145.

[7] Massinaei, M. (2015). Estimation of metallurgical parameters of flotation process from froth visual features. International Journal of Mining & Geo-Engineering, 49, 75-81.

[8] Jahedsaravani, A., Marhaban, M., & Massinaei, M. (2016). Application of statistical and intelligent techniques for modeling of metallurgical performance of a batch flotation process. Chemical Engineering Communications, 203, 151-160.

- ² Gray level co-occurrence matrix
- ³ International telecommunication union

⁵ Entropy

^[1] Marvinney, R. G. (2015). Overview of Maine metallic mineral deposits and mining. Maine Geological Survey Circular, 15-9.

⁶ Angular Second Moment

⁷ Inverse Difference Moment

⁸ Root mean squares error

¹ Color co-occurrence matrix

⁴Rougher